

面向复杂环境的仿昆虫扑翼飞行器关键技术研究

蒋柏毅 谢孟琪 王昱茹 黄俊程 石丽媛*

桂林学院 广西 桂林 541006

【摘要】：本文就仿昆虫扑翼飞行器在复杂环境中所遇到的动力效率低、抗扰性差、环境适应性差等主要问题展开系统的技术研究。根据昆虫飞行的气动、结构机理，设计梯度模量柔性翼面，提高升力性能和结构耐久性，提出柔性传感反馈的分布式抗扰控制策略，提高飞行器在扰动、受限空间中姿态的稳定性，结合改进的路径规划和多机协同算法，提高其自主导航和集群作业能力。

【关键词】：仿昆虫扑翼飞行器；压电驱动；智能算法

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.022

1 引言

随着低空应用场景日益复杂，传统固定翼和多旋翼无人机在狭小、高噪声敏感或强扰动环境下的局限性愈发明显。近些年来，国内学者在微型飞行器路径规划及集群协同方面取得了较大的进展，诸如改进人工蜂群算法的路径优化^[1]，超低空动态航线实时生成^[2]，仿生扑翼平台的轨迹规划研究^[3]等，给本工作给予了重要的支撑。另外已有研究已经提出了考虑能耗和载荷约束的模型^[4]，基于优先级协商的分布式避障策略等研究成果，为本文设计多机协同框架打下了基础。

2 FWMAV 系统设计与空气动力学基础

2.1 总体设计与机械结构

本文研制的 FWMAV 以蜜蜂为仿生对象，设计目标是在保证足够升力和机动性的前提下实现极致的轻量化。

FWMAV 系统总体架构

系统由五个核心部分组成：（1）压电驱动机构：采用 PZT-5H 压电陶瓷片，设计为变截面悬臂梁结构，在谐振频率 110Hz 下产生足够驱动力；（2）四连杆传动机构：将直线振动转换为翼翼的拍动运动；（3）被动扭转机构：利用空气动力实现翼翼±45° 的自动扭转；（4）仿生翼翼：采用聚酰亚胺薄膜和碳纤维翅脉，翼展 3cm；（5）机身结构：碳纤维复合材料，保证强度和轻量化。

2.2 压电驱动优化设计

设计的压电驱动器主要由 PZT 压电陶瓷片、碳纤维预浸料和 SGlass 组成。压电陶瓷片主要利用材料的逆压电效应，将电信号转换为材料的形变，从而产生所需的驱动位移与驱动力；SGlass 主要起刚性支撑与绝缘作用；碳纤维预浸料起导电与黏结层的作用，两端使用玻璃纤维作为固定端，尖端通过延伸将压电产生的微型形变进行放大从而带动翼翼的扑动。

2.3 非定常空气动力学建模

仿昆虫扑翼飞行器 (FWMAV) 一般工作在低雷诺数范围 $Re \approx 10^2 \sim 10^3$ ，其气动力具有显著的非定常特性，不能用传统的稳态气动模型来描述。为此本文采用 Dickinson 等人提出的半经验力分解模型，该模型通过果蝇尺度机械翅实验验证，把瞬时气动力分解成三部分， $F_{inst} = F_{trans} + F_{rot} + F_a$ ，其中 F_{trans} 是平移力，由翼翼相对于来流的速度和攻角 α 决定； F_{rot} 是旋转力，由于翼翼在拍打末端快速翻转所引起的环量突变（即 Kramer 效应）； F_a 是附加质量力，与翼翼加速度成正比，反映流体惯性效应。根据风洞和油槽实验数据，法向力系数 C_N 和切向力系数 C_T 可以近似为攻角的函数：

$$C_N \approx 1.8\pi \sin(2\alpha), C_T \approx \begin{cases} -0.4\cos(2\alpha), & \alpha \in [0, \pi/2] \\ 0.4\cos(2\alpha), & \alpha \in [-\pi/2, 0] \end{cases} \quad (1)$$

整机升力与推力通过对展向气动力沿翼翼展积分获得。

2.4 姿态控制策略

仿昆虫扑翼飞行器 (FWMAV) 一般没有传统的舵面，姿态控制主要依靠左右翼翼运动参数的差异来调整，即拍打幅度、频率或者相位偏移。为了实现高精度姿态跟踪，首先要建立其六自由度的非线性动力学模型。忽略位置的动态，只考虑姿态子系统，可以简化为

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}) + g(q)u + d(t) \quad (2)$$

其中， $q = [\theta, \phi, \psi]^T$ 分别为俯仰角、滚转角和偏航角； $u \in \mathbb{R}^3$ 为控制输入（如左右翼翼振幅差、扭转相位等）； $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 为未知或部分已知的非线性函数； $d(t)$ 表示外部扰动（如阵风、建模误差等）。

由于 FWMAV 系统存在强非线性、参数不确定性及高频驱动限制，传统线性控制器难以满足性能要求。本文采用模糊自适应控制 (Fuzzy Adaptive Control) 策略：利用模糊逻辑系统 (FLS) 逼近未知函数 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ ，并设计参数自适应

通讯作者：石丽媛，学生创新研究项目指导老师。

律在线更新模糊规则权重。所设计的控制律为:

$$u = \hat{g}^{-1}(-\hat{f} + \dot{q}_d - K_u \dot{e} - K_p e) \quad (3)$$

其中, $e = q_d - q$ 为姿态跟踪误差, q_d 为期望轨迹, $K_p, K_v > 0$ 为正定增益矩阵, \hat{f}, \hat{g} 为模糊系统对 f, g 的估计。

其中 $e = q_d - q$ 为姿态跟踪误差, q_d 为期望轨迹, $K_p, K_v > 0$ 是正定增益矩阵, \hat{f}, \hat{g} 为模糊系统对于 f, g 的估计。根据李雅普诺夫稳定性理论, 可以得到候选函数 $V = \frac{1}{2} \dot{e}^T \dot{e} + \frac{1}{2} e^T K_p e +$ 参数误差项, 从而证明闭环系统全局一致最终有界 (GUUB), 即姿态误差收敛到包含原点的有界邻域内, 界大小和扰动幅值、模糊逼近精度有关。该方法已经在微型扑翼机器人上进行了初步的试验, 并且可以有效地抑制模型不确定性以及外界干扰, 为之后的自主飞行打下控制的基础。

3 基于改进 A*算法的自主路径规划

3.1 问题描述与环境建模

在室内复杂环境中 (仓库), FWMAV 要从起点 S 自主飞行到终点 G, 并且避开静态、动态障碍物。用栅格法对环境进行离散化建模, 每个栅格的状态为自由或被占据。考虑到 FWMAV 的安全半径 $r_s = 0.15m$, 规划目标是最小化路径长度并且保证安全。

3.2 传统 A*算法局限性分析

传统 A*算法用评价函数 $F(n) = G(n) + H(n)$ 来选择扩展节点, 其中 $G(n)$ 是实际代价, $H(n)$ 是启发函数 (一般用欧几里得距离)。但是在 FWMAV 的应用中存在三个主要问题, 安全性不足, 路径可能紧贴障碍物, 没有考虑飞行器的尺寸。路径不平滑: 沿着栅格对角线行进会产生许多拐点, 不利于飞行控制。搜索效率低: 在复杂环境中会产生大量冗余搜索节点。

3.3 改进 A*算法设计

(1) 路径安全约束设计

为了保证飞行安全, 在子节点扩展时加入约束条件。父节点扩展 8 个邻域子节点的时候, 检查该方向相邻栅格是否为障碍物。如果扩展方向相邻的栅格有障碍, 则禁止扩展该子节点以及该方向上的几何关关节点。这就相当于在障碍物周围设置安全缓冲区。

(2) 动态启发函数权重

传统 A*启发函数的权重要素为 1。本文认为局部环境复杂度越高, 权重就越大。定义局部障碍率 $Q = M/N$, M 是当前节点和目标点连线所构成的矩形区域内的障碍栅格数, N 是该区域的总栅格数。权重 β 设为 $\beta = 1 - \ln(1+Q)$

当 Q 较小时 (开阔环境), $\beta \approx 1$, 算法偏向目标导向的快速搜索; 当 Q 较大时 (复杂环境), β 减小, 降低启发函数的影响, 扩大搜索范围, 避免局部最优。改进过的评价函数为 $F(n) = G(n) + \beta H(n)$ 。

(3) 路径平滑优化

对 A*产生的原始路径 $P_{raw} = \{S, n_1, n_2, \dots, G\}$, 使用视线检测的贪心平滑算法。检查非相邻三点 p_i, p_k, p_j ($i, j < k$), 如果 p_i 到 p_j 的直线不穿过任何障碍物安全区, 则删除中间所有的节点。迭代此过程直到路径不能再简化为止, 大大减少拐点的数量。

4 多 FWMAV 集群协同控制策略

4.1 集群系统架构

FWMAV 集群系统采用的是云边协同的架构。云端服务器来完成全局任务的分配以及路径规划, 各个 FWMAV 作为边缘节点去执行局部控制、实时避障、地面控制站来做监控, 并且提供人机交互界面。使用通信用 5.8GHz 图传和 915MHz 数传相结合的方式, 保证数据的实时性、可靠性。

4.2 人工蜂群算法优化设计

为了提高仿昆虫扑翼飞行器 (FWMAV) 的气动-结构耦合性能, 本文采用改进的人工蜂群算法对关键设计参数 (如翼翼刚度分布、拍打频率、相位差等) 进行全局优化。

(1) 混沌初始化增强种群多样性

传统随机初始化易导致初始解聚集, 降低搜索效率。本文采用 Logistic 混沌映射生成高遍历性的初始种群:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), \mu = 4, x_0 \in (0, 1) \setminus \{0.25, 0.5, 0.75\} \quad (4)$$

该映射在 $\mu = 4$ 时处于完全混沌状态, 能有效覆盖解空间, 避免早熟收敛。

(2) 自适应搜索策略

在雇佣蜂阶段, 传统 ABC 采用固定步长邻域搜索, 难以平衡全局探索与局部开发。本文提出动态衰减步长机制, 结合个体适应度与进化进度调整搜索强度:

$$u_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_{max}}\right) \cdot \frac{1}{f_i + \epsilon} \quad (5)$$

式中 t 是当前迭代次数, T_{max} 是最大迭代次数, f_i 是个体 i 的适应度值 (目标函数值, 升阻比或者能耗), $\epsilon > 0$ 是防止除零的小常数。高适应度个体后期精细搜索, 低适应度个体前期强探索。

(3) 精英保留机制

为防止优质解在选择过程中丢失, 每代将适应度排名前 10% 的精英个体直接保留至下一代, 不参与交叉或淘汰操作。该机制显著提升算法收敛稳定性。

4.3 多机任务分配模型

N 架仿昆虫扑翼飞行器 (FWMAV) 同时执行 M 个空间上分布的任务点 (侦察、采样或者投放等任务)。每架飞行器 k 初始能量为 E_0 , 最大载荷容量为 L_{max} , 任务点 i 消耗载荷 l_i 并且

只被访问一次。目标是最小化最大任务完成时间 (makespan), 也就是所有飞行器中最晚返回的时间, 从而提高整个系统的效率。

(1) 决策变量

引入三维二元变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{若飞行器 } k \text{ 从任务点 } i \text{ 直接飞往任务点 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $i, j \in \{0, 1, \dots, M\}$, 0 表示起始/返航基地

(2) 目标函数

$$\min C_{\max} = \max_{k=1, \dots, N} C_k \quad (7)$$

其中 C_k 为飞行器 k 完成其分配任务序列并返回基地的总时间。

(3) 约束条件

①任务覆盖约束 (每个任务点恰好被访问一次):

$$\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ijk} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (8)$$

②能量约束 (总飞行能耗不超过初始能量):

$$\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^M d_{ij} \cdot x_{ijk} \leq E_0 / \eta, \quad \forall k = 1, \dots, N \quad (9)$$

③载荷容量约束:

$$\sum_{i=1}^M l_i \cdot y_{ik} \leq L_{\max}, \quad \forall k \quad (10)$$

④流守恒约束 (保证路径连续性):

$$\sum_{j=0}^M x_{ijk} = \sum_{j=0}^M x_{jik}, \quad \forall i = 1, \dots, M; \forall k \quad (11)$$

该模型属于带容量与能量限制的多旅行商问题 (mTSPwithEnergyandPayloadConstraints), 该问题属于 NP-hard 问题。本文采用改进人工蜂群算法 (见 4.2 节) 结合局部搜索策略进行高效求解, 在保证可行性的前提下逼近最优任务分配方案。

4.4 分布式防撞机制

在集中式任务分配的基础上, 加入分布式实时防撞策略, 即 FWMAV 之间用通信广播各自的地理位置和运动速度, 接收到邻机的信息之后对未来的 Δt 时刻的轨迹做预测, 根据任务紧急程度或者 ID 大小来决定优先级协商, 低优先级机主动避让, 避让机触发局部重规划, 用第三章改进 A* 算法生成临时避让路径。该机制可以保证飞行的安全性, 又不会对全局的任务造成影响, 其核心思想和分布式多机避障中优先级协商一致的思想是一致的。

5 结论

本文针对复杂环境下的仿昆虫扑翼飞行器工程化难题, 从柔性翼面设计、抗扰控制、路径规划、集群协同四个方面展开研究。利用梯度模量材料、分布式模糊自适应控制和改进智能优化算法相结合的方式, 大幅度提高了样机在极寒、强风、狭小空间中的续航能力、稳定性、任务自主性, 给 FWMAV 在应急侦察、生态监测等场景的应用提供了一条可行的技术途径。

参考文献:

- [1] 任鑫磊, 胡燕海, 丁智坚, 等. 基于改进人工蜂群算法的无人飞行器路径规划[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(03): 58-63.
- [2] 马心逸. 智能飞行器超低空实时动态航线规划[D]. 中国民用航空飞行学院, 2025.
- [3] 余立均. 仿生扑翼微型飞行器路径规划研究[D]. 电子科技大学, 2021.
- [4] 秦苏洋. 面向扑翼飞行的非正常力增益机理及可控方法研究[D]. 上海交通大学, 2020.